

تأثیر نوع و مقدار محصولات پایه‌ی سیلیسی در پارامترهای رفتاری و مقاومت برشی مخلوط خاک - سیمان

میلاد تاج دینی* (دانشجوی دکتری)

مسعود حاجی علیلو (استاد)

هوشنگ کاتبی (دانشیار)

سینا گل محمدی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۳۹۷ (۶۱-۵۱)
دوری ۲ - ۳۴، شماره ۱/۲، ص. ۶۱-۵۱

خاک - سیمان مخلوطی از سیمان پرتلند، خاک و آب است که به واسطه‌ی عمل آبرفت سیمان و تراکم، اجزاء آن به هم چسبیده و ترکیبی متراکم، بادوام و با نفوذپذیری کم و مقاوم در برابر سایش ایجاد می‌کند. با توجه به اینکه تأثیر افزودن انواع سیمان در سال‌های اخیر در پارامترهای مختلف فیزیکی و مکانیکی خاک - سیمان بررسی شده است، در پژوهش حاضر به تأثیر افزودن محصولات سیلیسی در پارامترهای مقاومت برشی و رفتار این مصالح با استفاده از آزمایش سه‌محوری پرداخته شده است. برای این منظور در پژوهش حاضر از ۳ نوع افزودنی پایه‌ی سیلیسی شامل میکروسیلیس (با سطح ویژه‌ی $21 \text{ m}^2/\text{g}$) و دو نوع نانوسیلیس با سطح ویژه‌ی $200 \text{ m}^2/\text{g}$ و $380 \text{ m}^2/\text{g}$ در طرح اختلاط استفاده شده است. خاک مورد استفاده در پژوهش، ماسه‌ی مخلوط با رس (SC) بودند. همچنین پارامترهای اندازه‌گیری شده در آزمایش‌های مذکور، شامل: پارامترهای تنش‌های محصورکنندگی متفاوت، زمان عمل‌آوری، مقدار و نوع ماده‌ی سیلیسی بودند که بر روی طرح‌های اختلاط مختلف آزمایش شدند. نتایج آزمایش‌ها حاکی از آن بود که مصالح خاک - سیمان با افزودن محصولات سیلیسی، عملکرد برشی بسیار مناسب‌تری از خود نشان می‌دادند.

واژگان کلیدی: خاک - سیمان، نانوسیلیس، آزمایش سه‌محوری، مقاومت برشی، رفتار مصالح.

m.tajdini@tabrizu.ac.ir
mhbonab@gmail.com
katebi@tabrizu.ac.ir
sinagolmohamadi@gmail.com

۱. مقدمه

بتن بنا به تعریف، مخلوطی از اجزاء متشکل از یک سامانه است که شامل زیرسامانه‌های خمیر سیمان (سیمان و آب)، سنگ‌دانه‌ها (شن و ماسه) و حد اشتراک (محل اتصال) این اجزاست که آن را می‌توان به شکل‌های بسیار زیادی در آورد. بتن‌های ویژه نیز به بتن‌هایی با خصوصیات غیرمعمول یا بتن‌های تولیدشده با روش‌های غیرمعمول گفته می‌شود. خاک - سیمان نیز از جمله همین بتن‌های ویژه است. طبق تعریف ACI ۱۱۶R، خاک - سیمان مخلوطی است از خاک و مقدار سیمان مشخص و آب که با چگالی بالایی متراکم شده باشند. در نشریه‌ی ۵۴ کمیته‌ی بین‌المللی سدهای بزرگ، خاک - سیمان مخلوطی از سیمان پرتلند، خاک، و آب است که به واسطه‌ی آبرفت سیمان و تراکم ماشین‌آلات، اجزاء آن به هم چسبیده و ترکیبی متراکم و با دوام و نفوذپذیری کم و مقاوم در برابر سایش ایجاد می‌شود.

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۱۲/۱۱، اصلاحیه ۱۳۹۵/۳/۲۹، پذیرش ۱۳۹۵/۷/۲۵.

DOI: 10.24200/J30.2018.1354

۳۵-۵ درصد ریزدانه‌ی عبوری از الک ۲۰۰، بهترین صرفه‌ی اقتصادی را دارند؛ اما خاک‌های با بیش از ۲٪ مواد آلی، برای تثبیت به‌شدت غیرقابل قبول‌اند.^[۱۲] عمده‌ی استفاده‌ی خاک - سیمان به مصرف آن در لایه‌ی اساس روسازی اختصاص دارد، اما در دهه‌ی اخیر به‌دلیل رشد سدسازی در کشور، از آن به‌عنوان المان آب‌بند در شیب سدهای خاکی و یا خود المان آب‌بند (مانند فرازبند) تغییر کاربری داده است، به‌طوری که در ساخت فرازبند سدهای کارون ۴ گتوند، رودبار و بختیاری به استفاده از مصالح خاک سیمان از سوی پیمانکار توجه شده است.

در میان افزودنی‌های پوزولانی، میکروسیلیس که محصول جانبی کوره‌های قوس الکتریکی است، بهترین کارایی را در بتن دارد که پژوهشگران دلیل این رفتار مناسب را در داشتن مقدار زیاد سیلیس بی‌شکل (بیش از ۹۰٪) دانسته‌اند. ماده‌ی پوزولانی جدیدی که اخیراً برای استفاده در بتن مورد توجه قرار گرفته است، نانوسیلیس است که این ماده به‌صورت پودر جامد و یا امولسیون در آب موجود است. به نظر می‌رسد این ماده به دلیل میزان بالاتر سیلیس بی‌شکل و اندازه‌ی کوچک‌تر ذرات، عملکرد بهتری نسبت به میکروسیلیس داشته باشد. زیرا با کاهش یافتن اندازه‌ی ذرات، نسبت سطح مؤثر به حجم ذرات افزایش می‌یابد و اثرات سطحی قوی‌تر می‌شوند و می‌توان گفت واکنش‌پذیری مواد در ابعاد نانو بسیار افزایش می‌یابد. این افزایش در واکنش‌پذیری، خواص ویژه‌ی به ماده در ابعاد نانو در قیاس با مواد با ابعاد بزرگ‌تر می‌دهد. از آنجایی که ریزساختار محصولات پایه‌ی سیمانی نظیر بتن و خاک - سیمان نقش مهمی در تعیین خواص آن دارد، انتظار بر این است که استفاده از نانوذرات در آن تأثیرات قابل توجهی در خواص‌شان داشته باشند. زیرا نانوذرات استفاده‌شده در بتن از یک سو نقش پرکنندگی حفره‌های بسیار ریز در خمیر سیمان را دارند و از سوی دیگر می‌توانند تغییراتی را در فرایند آبرفت ایجاد کنند. با توجه به نقش نانوسیلیس در افزایش سرعت سخت‌شوندگی محصولات پایه‌ی سیمانی از یک سو و بالا بردن دوام‌شان از سوی دیگر، افزودن نانوسیلیس‌ها در طرح اختلاط می‌تواند به‌شدت به اقتصادی بودن طرح کمک کند.^[۱۳-۱۷]

در سال ۲۰۰۸، آزمایش‌های مختلفی بر روی سه دانه‌بندی مختلف از خاک ایالت واشنگتن انجام و نقش مثبت سیمان در بهبود خواص خاک با آزمایش‌های حدود اثر برگ، تراکم، مقاومت فشاری محدودنشده و سه‌محوری تحکیم یافته‌ی زهکشی نشده (CU) پیدا شده است.^[۸] نتایج آزمایش‌های سه‌محوری تحکیم یافته‌ی زهکشی نشده بر روی خاک و خاک تثبیت‌شده با درصد‌های مختلف سیمان بدین صورت بود که مصالح خاکی رفتار شکل‌پذیر از خود نشان دادند و با اضافه کردن ۵٪ سیمان به خاک موردنظر، کرنش به میزان ۲٪ افزوده شد و این نمونه تقریباً خواص هر دو رفتار برشی (شکل‌پذیر و شکننده) را از خود نشان داد. این در حالی است که با افزودن ۱۰٪ سیمان، نمونه افزایش محسوس فشار آب حفره‌ی را در حدود کرنش‌های پایین از خود نشان داد و رفتار مصالح کاملاً تردشکن بود.

برخی پژوهشگران (۲۰۱۲) نیز به بررسی پارامترهای مقاومت برشی خاک سیمان با استفاده از دستگاه سه‌محوری پرداختند. خاک مورد استفاده در آزمایش در طبقه‌بندی SP قرار داشت و تنش‌های محصورکننده، شامل ۱۰۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و کیلوپاسکال بود. نمونه‌ها هم شامل ترکیب ۵ تا ۸ درصد با سیمان بودند. نتایج نشان دادند که برای نمونه‌های با فشار محصورکننده، بیشتر نمونه‌ها از خود رفتار انقباضی نشان دادند و این در حالی است که نمونه‌های با فشار محصورکننده‌ی کمتر، رفتار انبساطی از خود نشان دادند. ایشان بیان کردند که رفتار مصالح خاک سیمان به‌شدت شبیه رفتار ماسه‌ی متراکم است و با استفاده از تحلیل حالت حدی مقاومت خاک سیمان را می‌توان به ۲ عامل شکستگی قفل و بست بین دانه‌ها و خمیر چسبنده‌ی

سیمانی و مقاومت پس از اتساع که منجر به کاهش یافتن مقاومت و نرم‌شوندگی آن می‌شود، نسبت داد.^[۹]

همچنین محققان در پژوهش دیگری (۲۰۱۲) با افزودن ۳، ۵ و ۱۰ درصد سیمان به خاک ماسه‌ی فیروزکوه، آن را تحت آزمایش‌های فشاری و کششی سه‌محوری قرار دادند و دریافتند که افزودن سیمان پرتند به کاهش رفتار ناهمسان در ماسه‌ها می‌انجامد و همچنین نوع مسیر بارگذاری نیز در مقاومت مصالح تأثیرگذار خواهد بود، به‌طوری که سختی و مدول کشسانی مصالح در فشار از کشش بیشتر خواهد بود.^[۱۰]

در سال ۲۰۱۳ نیز سه خاک مسئله‌دار شمال کشور (شامل: خاک رس رشت، ماسه‌ی انزلی و لس گرگان) با افزودن سیمان به آن‌ها تحت آزمایش‌های سه‌محوری تحکیم یافته - زهکشی شده قرار گرفتند و این نتیجه به‌دست آمد با آنکه افزودن سیمان منجر به افزایش مقاومت برشی می‌شود، اما رفتار نمونه‌ها از نرم به شکننده تغییر می‌کند. همچنین نتیجه گرفته شد که نمونه‌های بدون سیمان، نمونه‌های حاوی ۵٪ سیمان و نمونه‌های حاوی ۸٪ سیمان به ترتیب به‌صورت نرم، صفحه‌ی و دونیم شدن گسیخته می‌شوند.^[۱۱]

همچنین در پژوهش دیگری (۲۰۱۲)، مخلوط سیمان و ماسه‌ی حاوی شن تحت آزمایش‌های سه‌محوری قرار گرفت و این نتیجه به‌دست آمد که رفتار تنش - کرنش مصالح ذکرشده در باربرداری و بارگذاری مجدد تا زمانی که کرنش‌ها به مقدار منفی برسند، به‌صورت نرم‌شوندگی خواهد بود و نیز رفتار مصالح تا قبل از گسیختگی با یک مدل تجربی مبتنی بر رفتار مجزاء سیمان و دانه‌ها ارائه شد.^[۱۲]

در مطالعاتی در سال ۲۰۱۴، نیز با افزودن سیمان به ۳ نوع رس با حساسیت‌های متفاوت و آزمایش‌های سه‌محوری زهکشی‌نشده، این نتیجه به‌دست آمد که مقاومت پس‌ماند و نهایی مصالح مذکور با افزودن سیمان افزایش می‌یابد، لذا نرخ افزایش مقاومت کمتری در رس‌های حساس‌تر مشاهده می‌شود که دلیل آن را تغییرات در کانی‌های آن‌ها اعلام کرده‌اند.^[۱۳]

در مطالعات دیگری در همان سال، ماسه‌های بهسازی‌شده با سیمان، یک‌بار تحت شرایط فشار همه‌جانبه و بار دیگر تحت فشار تک‌بعدی به تحکیم رسیدند و سپس تحت شرایط زهکشی‌نشده برش زده شدند و نتیجه گرفته شد که تحت شرایط همه‌جانبه نسبت به شرایط یک‌بعدی، تغییرات مقاومت برشی و حجمی حدود ۱٫۵ برابر بیشتر خواهد بود.^[۱۴] همچنین با افزودن ۱، ۲ و ۳ درصد سیمان به ماسه‌ی خوب و بد دانه‌بندی‌شده تحت آزمایش‌های سه‌محوری، این نتیجه به‌دست آمد که زاویه‌ی اتساع و فشار آب حفره‌ی در مصالح بد دانه‌بندی‌شده از مصالح خوب دانه‌بندی‌شده بزرگ‌تر خواهد بود. و هر دوی مصالح خوب و بد دانه‌بندی‌شده در شرایط زهکشی‌شده، رفتار تردتری نسبت به شرایط زهکشی‌نشده از خود نشان می‌دهند.^[۱۵]

همان‌طور که از مروری بر مطالعات پیشین برمی‌آید، رفتار مصالح خاکی مخلوط با سیمان، بسیار پیچیده است و این پیچیدگی بیشتر ناشی از عوامل ناشناخته‌ی مؤثر این نوع از مصالح است. با توجه به اینکه نگرش نانو تکنولوژی امری بسیار جدید و مربوط به دهه‌ی اخیر است، در پژوهش حاضر، تأثیر افزودن نانوسیلیس به خاک - سیمان که تاکنون کمتر در مورد آن بحث شده است، بررسی خواهد شد. بنابراین رفتار ماتریس نانوسیلیس - خاک - سیمان با آزمایش‌های متفاوت باید بررسی شود، تا پارامترهای مؤثر در رفتار مصالح به نحو مطلوبی به‌دست آید. لذا در پژوهش حاضر سعی شده است تا پارامترهای مختلف تأثیرگذار در رفتار برشی این طرح اختلاط از جمله زمان عمل‌آوری و همچنین خصوصیات افزودنی سیلیسی، شامل نوع و مقدار آن در حالات متفاوت بررسی شوند.

۲. دستگاه، مصالح و روش انجام آزمایش

۱.۲. مصالح

۱.۱.۲. خاک

در پژوهش حاضر از یک نوع دانه بندی خاک مطابق استاندارد مورد قبول برای تهیه ی خاک - سیمان^[۲] مطابق شکل ۱ استفاده شده است که دانه بندی مصنوعی مورد نظر حاوی حدود ۲۰٪ خاک عبوری از الک ۲۰۰ است که میزان نسبتاً قابل توجهی است. در جدول ۱، نیز مشخصات دانه بندی نشان داده شده است.

۲.۱.۲. سیمان پرتلند

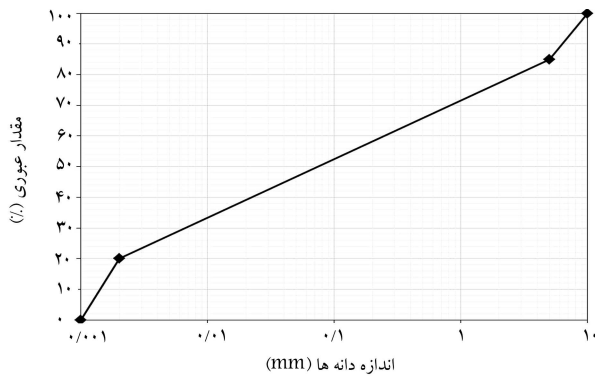
در آزمایش ها از سیمان پرتلند نوع ۲ مطابق استاندارد ASTM C ۱۵۰ که از کارخانه ی سیمان تهران با وزن مخصوص ۳/۱ گرم بر سانتی متر مکعب تهیه شده بود، استفاده شده است. لازم به ذکر است که سیمان مذکور مقاومت خوبی در مقابل حمله ی سولفاتی دارد و گرمای آبرفت مناسبی تولید می کند. در شکل ۲، نمودار دانه بندی سیمان پرتلند و در جدول ۲، میزان ترکیبات شیمیایی آن نشان داده شده است.

۳.۱.۲. آب

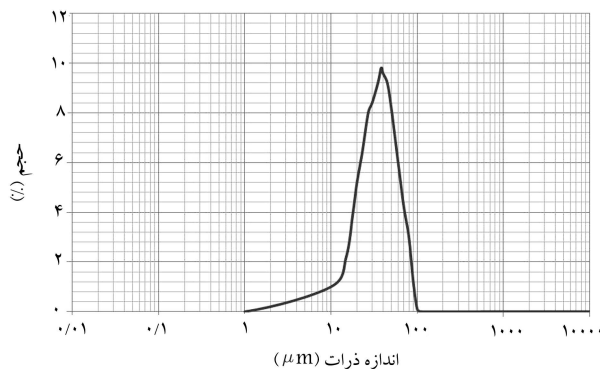
آب در خاک سیمان به منظور کمک در رسیدن به بیشینه ی تراکم و جهت آبرفت سیمان پرتلند ضروری است. آب قابل آشامیدن یا دیگر آب های نسبتاً تمیز که عاری از مواد مضره مانند املاح قلیایی یا اسیدها و یا املاح آلی باشند، می توانند در خاک سیمان استفاده شوند تا باعث فعل و انفعالات شیمیایی با سیمانی که در حال سخت شدن است، شوند.

۴.۱.۲. محصولات سیلیسی

در پژوهش حاضر از ۳ نوع محصول پایه ی سیلیسی شامل میکروسیلیس ۲ و نوع نانوسیلیس آنزوسل با دو سطح ویژه متفاوت محصول شرکت دکوسای آلمان استفاده شده است. این محصولات در ۳ درصد مختلف (۰٫۲۵، ۰٫۵، ۰٫۷۵ و درصد نسبت به وزن سیمان) به مخلوط خاک سیمان به صورت امولسیون افزوده شدند. خصوصیات این محصولات سیلیسی در جدول ۳ ارائه شده است.



شکل ۱. منحنی دانه بندی مورد استفاده در آزمایش.



شکل ۲. توزیع دانه بندی سیمان مورد آزمایش.

۲.۲. روش انجام آزمایش و تهیه ی نمونه ها

برای ساخت نمونه های آزمایشگاهی سه محوری، با هدف محاسبه ی درصد رطوبت بهینه و چگالی خشک بیشینه، مجموعه یی از آزمایش های تراکم بر روی نمونه های

جدول ۱. طبقه بندی خاک و مشخصات فیزیکی مصالح ماسه یی.

توصیف خاک طبق یونیفاید آشتو	C_c	C_u	LL	PL	PI	نوع مصالح
A-۲-۴ SC	۱۷	۱۲۰	۲۹	۲۰	۹	ماسه ی گردگوشه مخلوط با ماسه

جدول ۲. ویژگی های شیمیایی سیمان مورد آزمایش.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	MgO	SO ₃	Na ₂ O	ترکیب شیمیایی
۲۰٫۸	۵٫۲۱	۳٫۳۳	۰٫۶۳	۰٫۷۸	۲٫۲	۳٫۳۴	۰٫۱۲	مقدار (%)

جدول ۳. ویژگی های محصولات سیلیسی مورد آزمایش.

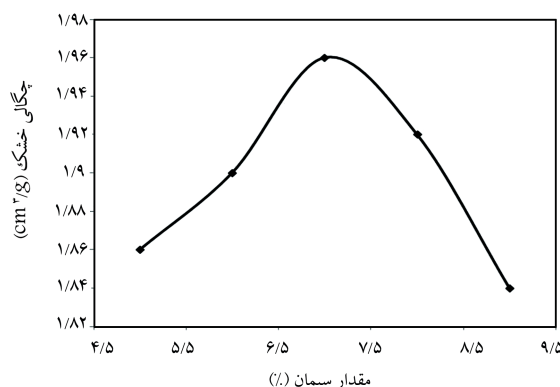
نوع	قطر متوسط ذرات (نانومتر)	درصد خلوص سیلیس بی شکل	سطح ویژه متوسط ذرات (متر مربع بر گرم)	جرم مخصوص (گرم بر سانتی متر مکعب)
میکروسیلیس	۶۰۰	< ۹۰٪	۲۱	۰٫۲۱
نانوسیلیس ۲۰۰	۱۵	< ۹۹٫۸٪	۲۰۰	< ۰٫۱۵
نانوسیلیس ۳۸۰	۸	< ۹۹٫۸٪	۳۸۰	< ۰٫۱۵

همچنین آزمایش‌های تراکم برای مخلوط‌های خاک سیمان کنترلی و خاک - سیمان آمیخته با محصولات سیلیسی مختلف انجام شد که نتایج آن برای وقتی که از ۰/۵٪ میکروسیلیس، نانوسیلیس ۲۰۰ و نانوسیلیس ۳۸۰ در طرح‌های اختلاط استفاده شد، در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تمامی مخلوط‌ها در ترکیب با محصولات سیلیسی نسبت به نمونه کنترلی کاهش محسوسی در چگالی خشک بیشینه و افزایش در مقدار رطوبت بهینه از خود نشان داده‌اند که مطابق با نتایج سایر پژوهشگران است.^[۷-۳] دلیل این مطلب را این‌گونه می‌توان بیان کرد که اولاً، ژل سیلیکات - کلسیم - هیدراته در حضور محصولات پایه سیلیسی با سرعت بیشتری تشکیل می‌شود که تراکم‌پذیری ماتریس را به علت استهلاک انرژی تراکمی مختل می‌کند و کاهش می‌دهد و ثانیاً، محصولات سیلیسی ابعاد بسیار بسیار کوچک‌تری نسبت به سنگ‌دانه‌ها دارند و در نتیجه، فضاهای خالی بین ذرات را پر می‌کنند که سبب افزایش اصطکاک بین‌دانه‌یی می‌شود و درهم فرو رفتن دانه‌ها را دچار مشکل می‌کند که تمامی نکات ذکر شده موجب کاهش چگالی نانوسیلیس - خاک - سیمان می‌شوند. همچنین به دلیل اینکه محصولات سیلیسی سطح ویژه بالایی دارند، میل واکنش‌پذیری بیشتری با آب دارند که سبب افزایش میزان رطوبت بهینه مخلوط نیز می‌شود. همچنین در شکل ۳، نتایج آزمایش تراکم برای یافتن مقدار بهینه محصولات پایه سیلیسی در طرح اختلاط نشان داده شده است که مطابق آن مخلوط حاوی میکروسیلیس در ۰/۷۵٪ و مخلوط‌های حاوی نانوسیلیس ۲۰۰ و نانوسیلیس ۳۸۰ در ۰/۵٪ به مقدار بهینه‌ی خود می‌رسند.

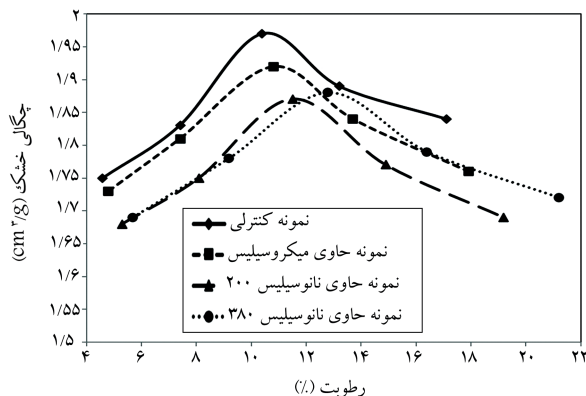
با توجه به اینکه مصالح خاک - سیمان عموماً در شرایط واقعی (المان‌های آبدبند) تحت تنش‌های محصورکننده‌ی نسبتاً زیاد قرار می‌گیرند، رفتار آن‌ها تحت تنش‌های محصورکنندگی متفاوت باید بررسی شود. همچنین اغلب بررسی‌ها بر روی رفتار مصالح خاک - سیمان تحت تنش‌های فشاری تک‌محوری بررسی و مطالعات محدودتری در مورد رفتار آن‌ها تحت تنش‌های سه‌محوری بحث و بررسی شده است.^[۱۶-۱۸] لذا به منظور بررسی جزئیات رفتار مقاومت برشی نمونه‌ها، آزمایش سه‌محوری تحکیم یافته - زهکشی شده بر روی نمونه‌ی مخلوط‌های بدون افزودنی محصولات پایه سیلیسی (نمونه کنترلی) و همچنین مخلوط‌های حاوی افزودنی‌های سیلیسی انجام شد.

فشارهای محصورکنندگی به ترتیب ۲۵، ۱۰۰ و ۵۰۰ کیلوپاسکال بودند. نمونه‌های آزمایش حاضر، در چگالی بیشینه و درصد رطوبت بهینه به منظور ایجاد بهترین تراکم تهیه شدند. برای ساخت نمونه‌ها از قالبی به قطر ۳/۵ و ارتفاع ۷/۱ سانتی‌متر استفاده شد. مصالح پس از ترکیب داخل قالب در ۳ لایه‌ی مساوی کوبیده شدند و حتی‌الامکان سعی شد در هنگام ساخت یکنواخت‌ترین مخلوط تهیه و هنگام بیرون آوردن نمونه‌ها از قالب، کمترین دست‌خوردگی ایجاد شود و نمونه‌ها برای زمان‌های عمل‌آوری ۳، ۷ و ۲۸ روز در داخل آب قرار داده شدند. در مرحله‌ی بعد پس از قراردادن نمونه‌ها داخل سلول با اعمال پس‌فشار، کاملاً اشباع شدند و در ادامه، مرحله‌ی تحکیم به مدت ۵ ساعت انجام شد. در پایان، نمونه‌ها در نرخ تغییر شکل ۰/۱ میلی‌متر بر دقیقه و به روش کرنش کنترل تحت برش قرار گرفتند.

شایان ذکر است که پارامتر B اسکمپتون به میزان قابلیت فشردگی مصالح بستگی دارد که با توجه به اینکه افزودن سیمان و نانوسیلیس قابلیت فشردگی خاک را به‌طور قابل ملاحظه‌یی کاهش می‌دهند، این مقدار حدود ۰/۷ در نظر گرفته شد. در ادامه، نقش هر یک از عوامل تأثیرگذار، مانند: تنش‌های محصورکنندگی، مقدار و نوع محصولات سیلیسی در زمان‌های عمل‌آوری مختلف در خواص مقاومت برشی مصالح نانوسیلیس - خاک - سیمان بحث و بررسی شده است.



الف) یافتن مقدار سیمان بهینه در نمونه خاک؛



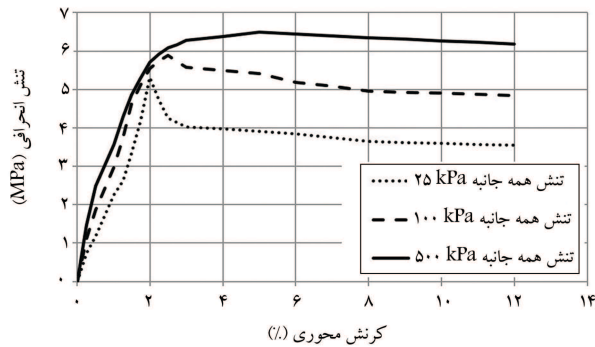
ب) منحنی‌های رطوبت-تراکم برای انواع محصولات سیلیسی؛



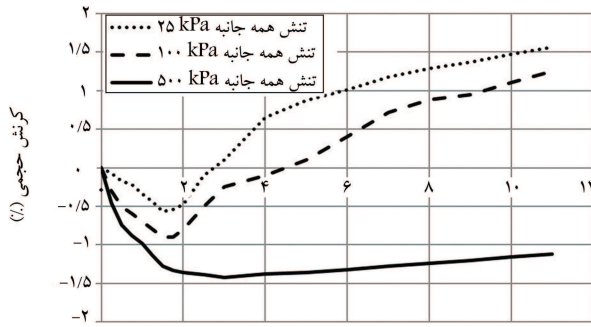
ج) مقدار محصولات پایه سیلیسی بهینه در طرح اختلاط.

شکل ۳. مقدار بهینه‌ی سیمان و محصولات سیلیسی در خاک - سیمان.

خاک سیمان کنترلی و خاک - سیمان حاوی محصولات سیلیسی مطابق استاندارد ASTM D558 انجام شدند. مطابق آزمایش مذکور، ابتدا سیمان و خاک را به‌صورت مخلوط همگنی درست می‌کنند و مقدار آب را به آن می‌افزایند. سپس این مخلوط در ۳ لایه و هر لایه با ۲۵ ضربه‌ی یک وزنه‌ی ۲/۵ کیلوگرمی متراکم می‌شوند. دقیقاً همین روش برای یافتن پارامترهای تراکم ماتریس نانوسیلیس - خاک - سیمان نیز استفاده شده است. بر این اساس در مورد طرح اختلاط نمونه‌ها مؤسسه‌ی انجمن مهندسان ارتش ایالات متحده برای دانه‌بندی فوق‌الذکر مقدار 2 ± 7 درصد سیمان (براساس وزن خشک سنگ‌دانه‌ها) را جهت تخمین اولیه‌ی طرح اختلاط پیشنهاد می‌کند و هر درصدی از مواد سیمانی که چگالی خشک بیشینه را بدهد، به‌عنوان طرح اختلاط بهینه مدنظر قرار می‌دهد. نتایج آزمایش مقدار سیمان بهینه در شکل ۳ الف نشان داده شده است و همان‌طور که مشاهده می‌شود، نمونه‌ها در مقدار ۰/۷٪ سیمان به مقدار چگالی خشک بیشینه‌ی خود رسیده‌اند.

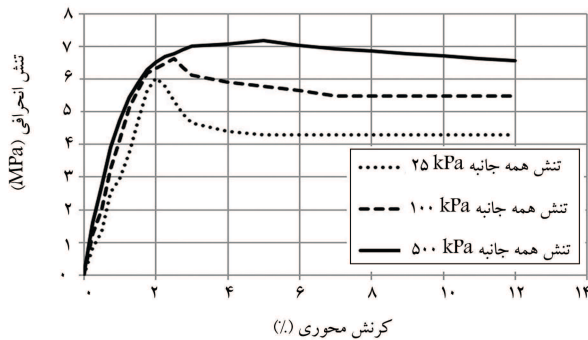


الف) منحنی های تنش انحرافی - کرنش محوری؛

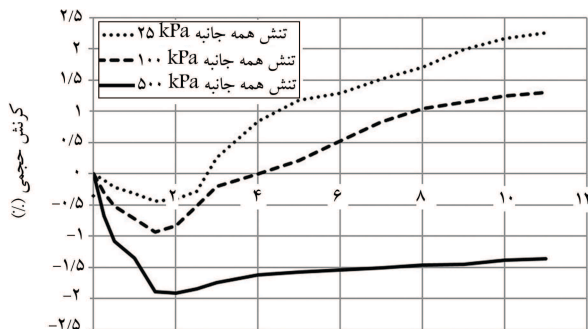


ب) منحنی های کرنش حجمی - کرنش محوری.

شکل ۴. نتایج آزمایش های سه محوری - زهکشی شده بر روی نمونه های کنترلی.



الف) منحنی های تنش انحرافی - کرنش محوری؛



ب) منحنی های کرنش حجمی - کرنش محوری.

شکل ۵. نتایج آزمایش های سه محوری - زهکشی شده بر روی نمونه های حاوی افزودنی سیلیسی.

۳. بررسی آزمایش های مقاومت برشی بر روی نمونه های

کنترلی و حاوی سیلیس

۱.۳. آزمایش های سه محوری زهکشی شده بر روی نمونه های کنترلی

نمودارهای تنش انحرافی - کرنش محوری و نیز کرنش حجمی - کرنش محوری برای نمونه های خاک - سیمان کنترلی در سن عمل آوری ۷ روزه و در فشارهای همه جانبه ۲۵، ۱۰۰ و ۵۰۰ کیلوپاسکال در شکل ۴ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، تنش انحرافی با افزایش فشار همه جانبه زیاد شده است. علاوه بر آن، افزایش فشار همه جانبه سبب تغییر حالت شکست نمونه ها شده است، به طوری که در فشارهای همه جانبه نسبتاً کم (۲۵ و ۱۰۰ کیلوپاسکال) حالت شکست نمونه ها شبیه مصالح ترد است و تنش قابل تحمل مصالح در آن ها به صورت مشخص، توسط نقطه ای اوج منحنی مشاهده می شود و مصالح پس از این مرحله، دچار کرنش نرم شوندگی شده اند، در حالی که برای فشارهای همه جانبه بزرگ تر (۵۰۰ کیلوپاسکال) رفتار مصالح شکل پذیرتر بوده و کرنش محوری نظیر تنش بیشینه به مقادیر حدود ۶-۵ درصد رسیده است. در این شرایط منحنی تنش - کرنش مقادیر کرنش محوری بیشتری را تحمل می کنند که این رفتار مطابق با نتایج سایر پژوهشگران در مورد مصالح سیمانته است. [۱۹-۲۱]

شایان ذکر است نمونه هایی که تحت فشار همه جانبه کوچک تر (۲۵ کیلوپاسکال) قرار گرفته اند، پس از رسیدن به تنش برشی بیشینه در تغییر مکان افقی کوچکتری به مقدار تقریباً ثابتی از تنش برشی می رسند. همچنین در منحنی های کرنش حجمی - کرنش محوری نیز مشاهده می شود که مصالح پس از نشست اولیه از خود رفتار اتساعی بروز داده اند، که حاکی از باز شدن قفل و بست میان دانه هاست.

۲.۳. آزمایش های سه محوری زهکشی شده بر روی نمونه های حاوی

محصولات پایه سیلیسی

آزمایش های مقاومت برشی سه محوری برای مخلوط های حاوی افزودنی های سیلیسی نیز برای سه فشار همه جانبه ۲۵، ۱۰۰ و ۵۰۰ کیلوپاسکال تکرار شد. برای نمونه، نتایج آزمایش ها برای نمونه های خاک - سیمان حاوی نانو سیلیس ۲۰۰ در شکل ۵ نشان داده شده است و همان طور که مشاهده می شود، از لحاظ کیفی منحنی های مذکور تقریباً به مصالح کنترلی شباهت دارند و تفاوت آن ها در افزایش مقاومت فشاری بیشینه و رفتار اتساعی محسوس تر آن در شرایط متناظر نسبت به مصالح خاک - سیمان کنترلی است.

بررسی در منحنی های مذکور نشان می دهد که تا قبل از تسلیم، مقادیر تنش انحرافی افزایش یافته و در عین حال شبکه قفل و بست سیمانی اتساع را به تأخیر انداخته است که بدان معناست که انرژی گسیختگی، اغلب صرف شکستن بندهای سیمانی شده است تا اینکه صرف اتساع مصالح شود. بنابراین پس از تسلیم نرخ افزایش، تنش کاهش می یابد، اما تغییرات حجم سرعت می گیرد. شکستن بندهای سیمانی منجر به کاهش نرخ مقاومت می شود، اما هم زمان سبب افزایش حجم می شود، که برخی پژوهشگران، [۲۳، ۲۲] دلیل آن را این گونه بیان کرده اند که بندهای سیمانی مذکور پس از رهایی در مخلوط نقش روان کاری ایجاد می کنند و موجب افزایش حجم مصالح می شوند. و رابطه ی ۱ را برای کار انجام شده بر روی مصالح دانه یی سیمانته شده پیشنهاد داده اند:

$$\Delta W_t = \Delta W_f + \Delta W_b \quad (1)$$

که در آن، ΔW_t مقدار کار نهایی انجام شده توسط تنش‌ها برای گسیختگی ماتریس کلی مصالح، ΔW_f کار لازم برای گسیختگی بخش اصطکاکی مصالح (دانه‌ها) و ΔW_b کار لازم برای گسیختگی بخش قفل و بستی مصالح (سیمان‌ها) است. همچنین نتیجه‌گیری کردند که مکانیزم خرابی در سطوح تنش پایین توسط بندهای سیمانی و در سطوح تنش بالا توسط اصطکاک دانه‌های مصالح کنترل می‌شود، که بنا بر نظریه‌ی مذکور، تفاوت‌هایی در رفتار دو مصالح کنترلی و حاوی محصولات سیلیسی مشاهده می‌شود. به طوری که در سطوح تنش پایین، افزایش مقاومت فشاری ماتریس خاک - سیمان - نانوسیلیس، نسبت به سطوح تنش بالاتر مشهودتر است که بیان‌گر آن است که افزودن نانوسیلیس با افزایش مقاومت بخش خمیری مصالح، به طور اخص سبب تقویت پارامتر چسبندگی مصالح می‌شود و در افزایش پارامترهای اصطکاکی نقش به‌خصوصی ایفا نخواهد کرد.

۴. تحلیل نتایج آزمایش‌های مقاومت برشی

۴.۱. پوش گسیختگی و زاویه‌ی اصطکاک در مصالح کنترلی و حاوی سیلیس

در شکل ۶، منحنی تغییرات تنش برشی بر حسب تنش قائم برای تمامی مصالح خاک - سیمان، خاک - سیمان - میکروسیلیس، خاک - سیمان - نانوسیلیس ۲۰۰، خاک - سیمان - نانوسیلیس ۳۸۰ نشان داده شده است.

با توجه به نتایج شکل مذکور، پوش گسیختگی کلیه مصالح خاک - سیمان کنترلی و حاوی افزودنی‌های سیلیسی تقریباً غیرخطی است و این غیرخطی بودن در سطوح تنش پایین، خود را بیشتر نشان می‌دهد. در حقیقت دلیل غیرخطی بودن پوش گسیختگی مصالح مذکور، کاهش نرخ افزایش حجم و اتساع مصالح به علت شکسته شدن قفل و بست درونی مصالح با افزایش سطح تنش است. [۲۲-۲۴] نکته‌ی دیگر اینکه مصالح سیمانته، تنش‌های کششی را تحمل می‌کنند و این درحالی است که مدل رفتاری موهر - کولمب بر این فرض استوار است که کشش را برای مصالح در نظر نمی‌گیرد که با در نظر گرفتن نکات ذکر شده، معیار خطی موهر - کولمب $(\tau_p = \sigma_n \tan(\varphi) + c)$ برای تعریف رفتار دقیق مصالح مورد نظر مناسب نیست. مطابق شکل ۶ و مطالعه‌ی چارلز و واتز، رابطه‌ی ۲ برای پوش گسیختگی مصالح

سیمانته پیشنهاد می‌شود: [۲۵]

$$\tau_p = A \sigma_n^b \quad (2)$$

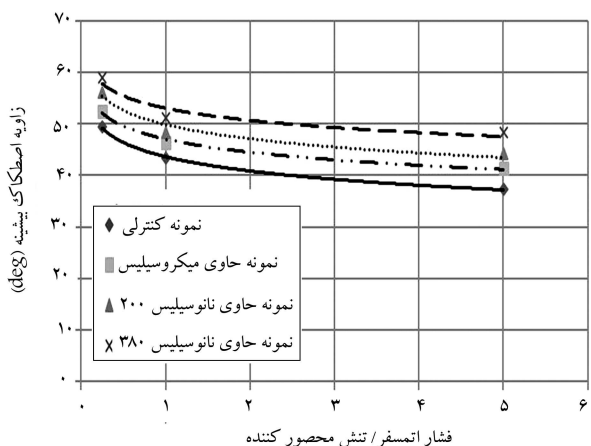
که در آن، A و b وابسته به نوع مصالح از طریق منحنی پوش گسیختگی تعیین می‌شوند، که در جدول ۴ برای تمام مصالح نشان داده شده‌اند. نکته‌ی قابل ذکر دیگر در مورد شکل ۶ این است که نمونه‌های کنترلی نسبت به نمونه‌های حاوی افزودنی سیلیسی تحت تنش برشی پایین‌تری به گسیختگی می‌رسند و با افزایش تنش قائم، اختلاف میان پوش‌های مذکور افزایش می‌یابد.

شایان ذکر است با توجه به رابطه‌ی ۱ و همچنین بر پایه‌ی روش ونت - جنز، [۲۶] مدل‌سازی رفتار خاک‌های سیمانته با جداسازی دو بخش خاک غیرسیمانته (اصطکاکی) و بندهای سیمانی (چسبندگی) بیان می‌شود که برای بخش اصطکاکی مدل مانزال و برای بخش سیمانی مدل حائری - حمیدی و برای مدل رفتاری خاک سیمانته توصیه می‌شود، [۲۷، ۲۸] که ترکیب هر دو روش از معتبرترین روش‌های تعیین رفتار خاک‌های سیمانته است، ولی در نوشتار حاضر فقط به رسم پوش گسیختگی و اعتبارسنجی آن‌ها با مدل موهر - کولمب و چارلز - واتز پرداخته شده است که با توجه به مقاومت پایین خاک - سیمان طبیعتاً رفتار آن باید به سنگ‌های کم‌مقاومت قرابت داشته باشد که مدل‌های مذکور برای این منظور استفاده شدند. با توجه به اینکه مدل چارلز - واتز برای سنگ‌ریزه‌ها تبیین شده و همچنین پوش گسیختگی آن غیرخطی بوده است، مدل ذکر شده رفتار پوش را تا حدود مناسبی بیان می‌کند، زیرا پوش موهر - کولمب خطی است و رفتار مصالح سیمانته را به خوبی بیان نمی‌کند. همچنین در شکل ۷، منحنی تغییرات زاویه‌ی اصطکاک بیشینه بر حسب نسبت تنش محصورکنندگی بر فشار اتمسفر (Pa) برای کلیه مصالح ذکر شده نشان داده شده است.

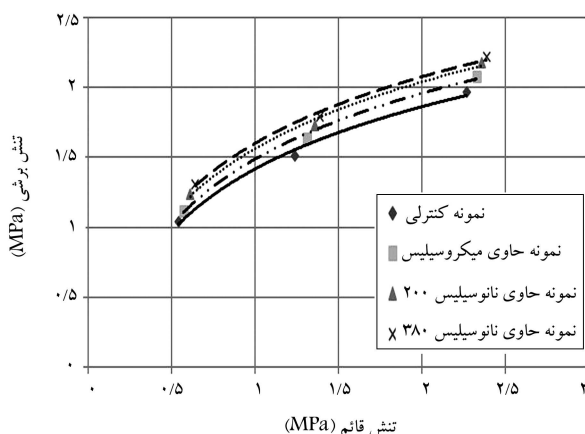
زاویه اصطکاک بیشینه‌ی (ϕ_p) مصالح نیز از رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود:

$$\phi_p = \tan^{-1} \left(\frac{\tau_p}{\sigma_p} \right) \quad (3)$$

که در آن، (τ_p) بیشینه‌ی مقدار تنش برشی است. مطابق شکل ۷ مشاهده می‌شود که زاویه‌ی اصطکاک بیشینه‌ی مصالح خاک - سیمان کنترلی و حاوی افزودنی سیلیسی برای هر دو حالت رابطه‌ی غیرخطی با تنش محصورشدگی دارد و با افزایش تنش برشی، زاویه‌ی اصطکاک بیشینه در مصالح کاهش یافته است. ضمناً در طرح



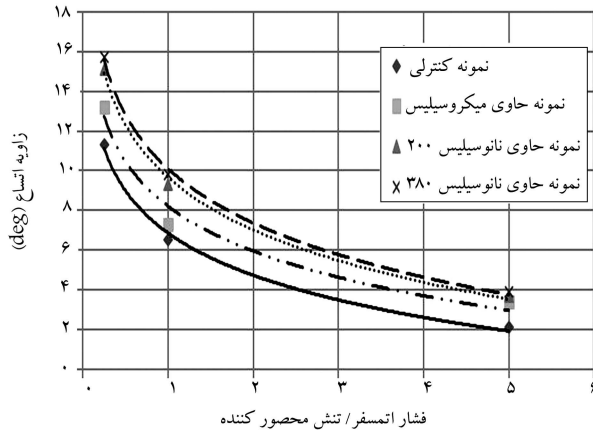
شکل ۷. منحنی تغییرات زاویه‌ی اصطکاک بیشینه بر حسب تنش محصورکننده برای مصالح کنترلی و حاوی افزودنی سیلیسی.



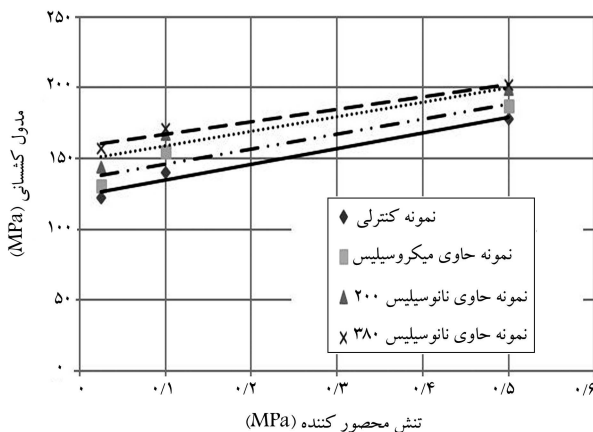
شکل ۶. پوش گسیختگی تنش برشی بر حسب تنش قائم برای مصالح کنترلی و حاوی افزودنی سیلیسی.

جدول ۴. پارامترهای رابطه‌های ۴ و ۵ و مقدار زاویه‌ی اصطکاک داخلی (از پوش خطی موهر - کولمب) مصالح کنترلی و حاوی افزودنی سیلیسی.

نوع مصالح	A	b	D	φ° از رابطه‌ی		Δφ°	φ°
				۵	۴		
خاک - سیمان	۵/۸۱	۰/۷	-۰/۱۸	۵۶/۲	۵۵/۵	۱۹/۲	۳۷/۲
خاک - سیمان - میکروسیلیس	۶/۵۲	۰/۶۸	-۰/۱۷	۵۵/۶	۵۶/۱	۲۰/۶	۳۶/۵
خاک - سیمان - نانوسیلیس ۲۰۰	۳/۹۴	۰/۷۶	-۰/۱۴	۵۲/۲	۵۲/۳	۱۷/۹	۳۶/۷
خاک - سیمان - نانوسیلیس ۳۸۰	۴/۲۴	۰/۷۳	-۰/۱۷	۵۰/۲	۵۰/۱	۱۷/۹	۳۲/۹



شکل ۸. تغییرات زاویه‌ی اتساع با نسبت تنش محصورکننده مصالح کنترلی و حاوی سیلیس.



شکل ۹. تغییرات ضریب ارتجاعی با تنش محصورکننده مصالح کنترلی و حاوی سیلیس.

کنترلی رسیده است. همین روند در مصالح حاوی افزودنی‌های سیلیسی نیز مشاهده می‌شود که با افزایش سطح ویژه‌ی محصولات حاوی سیلیس، زاویه‌ی اتساع آن‌ها نیز افزایش خواهد یافت و در واقع به‌طور میانگین، حدود ۲ تا ۶ درجه افزایش زاویه‌ی اتساع در مصالح حاوی سیلیس نسبت به نمونه‌ی کنترلی مشاهده می‌شود، که این مطلب با توجه به تأثیر مثبت زاویه‌ی اتساع در مقاومت برشی مصالح تأیید می‌شود. همچنین مقدار ضریب ارتجاعی با افزایش تنش محصورکنندگی برای طرح اختلاط‌های مختلف افزایش یافته است که میزان آن در مخلوط‌های مختلف متفاوت است و برای مخلوط‌های حاوی محصولات سیلیسی ضریب ارتجاعی بالاتر است؛ که دلیل آن را می‌توان به افزایش سختی مخلوط‌های مذکور نسبت داد که البته

اختلاط‌های حاوی محصولات پایه‌ی سیلیسی، زاویه‌ی اصطکاک نسبت به مصالح کنترلی افزایش یافته است.

علاوه بر آن، چنانچه پوش گسیختگی مصالح کنترلی و حاوی سیلیس به صورت خطی رسم شوند، با توجه به رابطه‌ی خطی موهر - کولمب، شیب آن خط، مقدار تانژانت زاویه‌ی اصطکاک داخلی مصالح (φ) را بیان می‌کند که در جدول ۴ مقادیر ذکرشده برای تمامی نمونه‌ها ثبت شده است.

براساس نتایج شکل ۷، رابطه‌ی ۴ ارتباط بین زاویه‌ی اصطکاک بیشینه و تنش محصورشدگی را بیان می‌کند:

$$\phi_p = \phi_0 \left[\frac{\sigma_r}{P_a} \right]^{-D} \quad (4)$$

که در آن، φ زاویه‌ی اصطکاک مصالح به ازاء فشار محصورکنندگی مساوی با ۱ اتمسفر بر روی نمونه و D مقداری ثابت براساس نوع مصالح انتخاب می‌شود، که این دو پارامتر را می‌توان از روابط غیرخطی به‌دست آمده از شکل ۷ به‌دست آورد. پژوهشگران علاوه بر رابطه‌ی ۴، رابطه‌ی ۵ را نیز برای ارتباط زاویه‌ی اصطکاک بیشینه با تنش محصورکنندگی بر روی نمونه‌های سیمانته ارائه داده‌اند: [۲۱]

$$\phi_p = \phi_0 - \Delta\phi \text{Log} \left[\frac{\sigma_r}{P_a} \right] \quad (5)$$

که در آن، Δφ مقدار کاهش زاویه‌ی اصطکاک مصالح به ازاء ۱۰ برابر افزایش تنش محصورکنندگی بر روی آن است. در جدول ۴، مقادیر D و Δφ برای هر حالت: مصالح خاک - سیمان کنترلی، خاک - سیمان میکروسیلیس، خاک - سیمان نانوسیلیس ۲۰۰ و خاک - سیمان نانوسیلیس ۳۸۰ نشان داده شده است. همچنین برای مقایسه‌ی مقدار φ به‌دست آمده از دو رابطه‌ی ۴ و ۵، می‌توان به جدول ۳ مراجعه کرد.

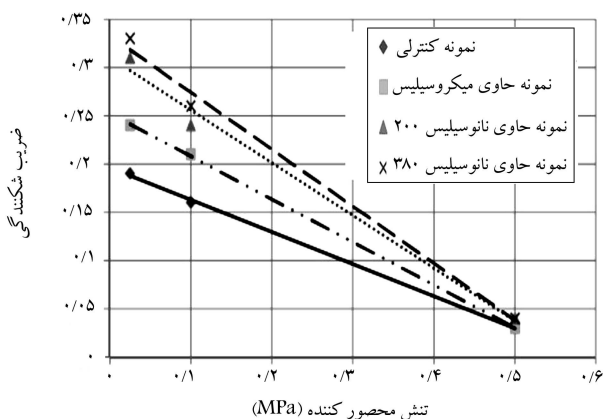
۲.۴. زاویه‌ی اتساع و مدول کشسانی برای مصالح کنترلی و حاوی افزودنی سیلیسی

با مراجعه به نمودارهای به‌دست آمده از آزمایش، می‌توان دو پارامتر ضریب ارتجاعی (E) و زاویه‌ی اتساع (ψ) را مطابق روابط ۶ و ۷ تعریف کرد:

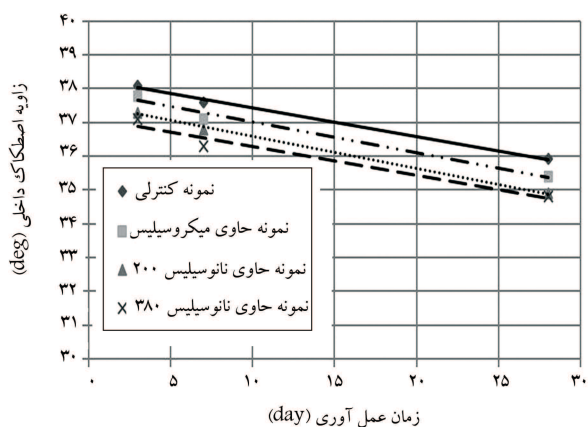
$$E = \frac{d\sigma_d}{d(\varepsilon_t)} \Big|_{\varepsilon_t=0} \quad (6)$$

$$\psi = \tan^{-1} \left[\frac{d(\varepsilon_v)}{d(\varepsilon_t)} \right]_{\max} \quad (7)$$

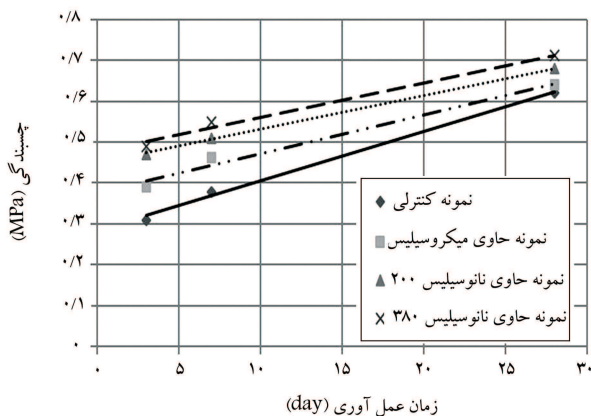
شکل‌های ۸ و ۹، تغییرات زاویه‌ی اتساع و ضریب ارتجاعی بر حسب تنش محصورکنندگی را برای نمونه‌های کنترلی و حاوی افزودنی‌های سیلیسی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش تنش محصورکنندگی در نمونه، زاویه‌ی اتساع به صورت غیرخطی کاهش یافته است، به طوری که مقدار آن از ۱۱/۴° به ۲/۱° در نمونه‌ی



شکل ۱۰. تغییرات شاخص شکنندگی برای مصالح خاک - سیمان کنترلی و حاوی محصولات سیلیسی.



الف) نمودارهای زاویه اصطکاک داخلی؛



ب) نمودارهای پارامتر چسبندگی.

شکل ۱۱. تاثیر زمان عمل آوری در پارامترهای مقاومت برشی برای مصالح خاک - سیمان کنترلی و حاوی محصولات سیلیسی.

۲.۵. اثر زمان عمل آوری در رفتار مصالح خاک - سیمان

تغییرات زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی در زمان‌های عمل آوری مختلف ۳، ۷ و ۲۸ روزه در شکل ۱۱ برای مخلوط‌های مختلف نشان داده شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل مذکور مشاهده می‌شود که چسبندگی تمامی مصالح با

وقتی تنش‌های محصورکننده افزایش می‌یابند، به دلیل شکل‌پذیرتر شدن مخلوط، نرخ افزایش ضریب ارتجاعی مخلوط‌ها نیز کاهش محسوس‌تری یافته است.

۵. عوامل مؤثر در رفتار مصالح کنترلی و حاوی افزودنی سیلیسی

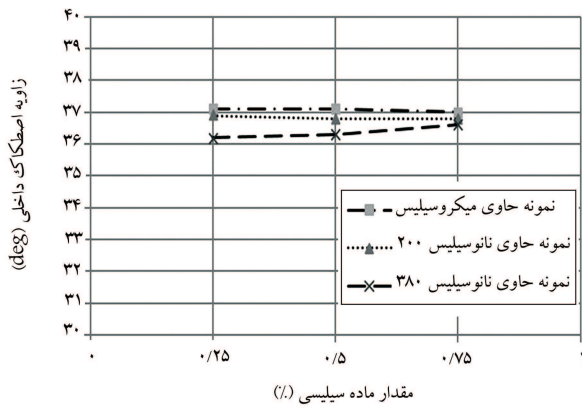
با توجه به اینکه بسیاری از خواص محصولات پایه سیمانی، مانند بتن و خاک - سیمان به عنوان یک نانوماده، از جمله خواص مکانیکی (مانند: مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مدول ارتجاعی، خزش و جمع‌شدگی) و خواص دوامی (مانند: دوام در برابر حملات شیمیایی سولفات‌ها و یون کلر، دوام در برابر سیکل ذوب و یخ‌بندان و دوام در برابر پدیده‌ی کربناسیون) ناشی از ساختار در ابعاد نانو است، بدیهی است استفاده از نانوذرات در خاک - سیمان می‌تواند تغییراتی در خواص ذکر شده ایجاد کند. با توجه به این توضیحات می‌توان چنین بیان کرد که فناوری نانو بیشتر از آنکه علمی جدید باشد، رویکردی جدید است که در زمینه‌های مختلف علوم وارد شده و تغییراتی در دیدگاه‌ها و روش‌ها ایجاد کرده است که مهم‌ترین تغییرات در مقیاس ریزساختاری ذرات است.^[۲۹] بنابراین بالطبع با آزمایش‌های گوناگون باید آثار افزودن این مواد در رفتار مصالح خاک - سیمان سنجیده شود. در این راستا، آثار تنش‌های محصورکنندگی مختلف، زمان‌های عمل آوری متفاوت و ترکیب با انواع محصولات سیلیسی و مقادیر مختلف آن‌ها در پژوهش حاضر بررسی شده است، که در ذیل به صورت مجزا بحث و بررسی شده‌اند.

۱.۵. اثر تنش محصورکنندگی در رفتار مصالح خاک - سیمان

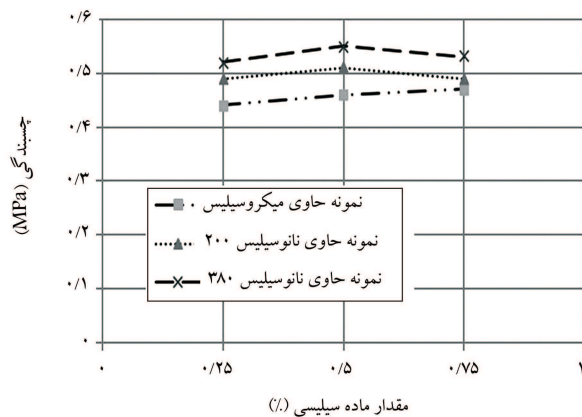
جهت بررسی اثر تنش محصورکنندگی در میزان تغییرات مقاومت برشی مصالح کنترلی و حاوی افزودنی سیلیسی، آزمایش‌های مقاومت برشی سه‌محوری استاندارد با اعمال سه سطح تنش ۲۵، ۱۰۰ و ۵۰۰ کیلوپاسکال بر روی مصالح صورت پذیرفت. همان‌طور که پیشتر نیز ذکر شد، نتایج پژوهشگران مختلف حاکی از این مطلب است که محصولات پایه سیمانی هنگامی دچار گسیختگی برشی می‌شوند که قفل و بست سیمانی آن‌ها دچار گسیختگی شود و در نتیجه هر مقدار میزان مواد سیمانی مصالح بیشتر باشد، در سطح تنش بالاتری دچار گسیختگی می‌شوند و پس از گسیختگی دچار تنش پسماند می‌شوند. برای این منظور شاخص شکنندگی توسط بیشتاپ به صورت رابطه‌ی ۸ تعریف شده است:^[۳۰]

$$I_B = \frac{q_p - q_r}{q_p} \quad (8)$$

که در آن، q_p و q_r به ترتیب تنش انحرافی بیشینه و تنش انحرافی پسماند هستند. تغییرات شاخص شکنندگی به عنوان تابعی از تنش محصورکننده در شکل ۱۰ برای ترکیب‌های مختلف خاک سیمان کنترلی و خاک - سیمان حاوی محصولات سیلیسی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش تنش محصورکنندگی، پارامتر مذکور کاهش یافته است که برای مخلوط‌های حاوی محصولات سیلیسی با سطح ویژه بالاتر این کاهش محسوس‌تر خواهد بود که بیان‌گر این مطلب است که افزودن نانوسیلیس‌ها در مصالح خاک - سیمان، در تنش‌های محصورکنندگی یکسان سبب تردتر شدن و شکننده‌تر شدن مصالح خاک - سیمان می‌شوند.



الف) نمودارهای زاویه اصطکاک داخلی؛



ب) نمودارهای پارامتر چسبندگی.

شکل ۱۲. تأثیر مقدار محصول سیلیسی در پارامترهای مقاومت برشی.

نوع نانوسیلیس، ماهیت فرایند آبرفت مخلوط تغییر می‌کند، اما با افزودن همان نوع از نانوسیلیس فقط فضاهای خالی نانومتری پر می‌شود و خوشه‌های اضافی سیلیکات - کلسیم - هیدراته تشکیل نمی‌شوند و این امر بیان‌گر اهمیت بالای سطح ویژه‌ی محصولات سیلیسی را در مخلوط نشان می‌دهد. برخی پژوهشگران دلیل تأثیر نانوسیلیس با سطح ویژه بالاتر در بتن‌های پرمقاومت را که مقاومت آنها بیش از ۵۰ مگاپاسکال است، تولید خوشه‌های اضافی ژل در ناحیه‌ی انتقالی بتن دانسته‌اند.^[۳۴،۳۳]

۶. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، آزمایش‌های مقاومت برشی توسط دستگاه سه‌محوری بر روی مصالح خاک - سیمان مخلوط‌شده با ۳ نوع محصول سیلیسی با سطح ویژه متفاوت شامل میکروسیلیس (با سطح ویژه $21 m^2/g$)، نانوسیلیس ۲۰۰ (با سطح ویژه $200 m^2/g$) و نانوسیلیس ۳۸۰ (با سطح ویژه $380 m^2/g$) انجام و اثر پارامترهای مختلف تنش محصورکنندگی، زمان عمل‌آوری، نوع و مقدار محصول سیلیسی در مخلوط ارزیابی شدند. برخی از نتایج حاصل از آزمایش‌ها به این شرح هستند:

- نتایج آزمایش تراکم بر مخلوط خاک - سیمان - نانوسیلیس نشان دادند که مقدار بهینه‌ی محصولات در ماتریس به سطح ویژه آن‌ها وابسته است، به طوری که

افزایش زمان عمل‌آوری افزایش قابل توجهی یافته و مقدار اصطکاک داخلی آن‌ها اندکی کاهش پیدا کرده است. دلیل این مطلب را می‌توان این‌گونه بیان کرد که با افزایش زمان عمل‌آوری مصالح، فرایند آبرفت تکمیل می‌شود و چسبندگی خمیر سیمانی و اتصال بین دانه‌ها افزایش می‌یابد که در نتیجه سبب افزایش پارامتر چسبندگی مصالح می‌شود.

ذکر این نکته ضروری است که برخی پژوهشگران دلیل این امر را تسریع واکنش‌های پوزولانیک و شروع سریع‌تر واکنش‌های آبرفت در مصالح تثبیت‌شده با سیمان و نانوسیلیس دانسته‌اند.^[۳۲،۳۱] لازم به یادآوری است که این افزایش چسبندگی برای طرح اختلاط‌های مختلف تفاوت‌هایی دارد که در بخش‌های بعدی بیشتر بحث و بررسی شده‌اند.

۳.۵. اثر نوع محصولات سیلیسی در رفتار مصالح خاک - سیمان

با مراجعه‌ی مجدد به شکل ۱۱ می‌توان دریافت که پارامترهای مقاومت برشی در مصالح خاک - سیمان حاوی محصولات پایه‌ی سیلیسی، افزایش محسوس‌ی نسبت به همین پارامترها در خاک - سیمان کنترلی دارند که این تأثیر بیشتر در پارامتر چسبندگی مشاهده می‌شود. مطابق نمودارهای شکل ۱۱ ب، هر چه مصالح سیلیسی سطح ویژه‌ی بیشتری داشته باشند، نرخ رشد پارامتر چسبندگی در آن‌ها با تکمیل فرایند زمان عمل‌آوری افزایش می‌یابد.

دلیل این مطلب را این‌گونه می‌توان بیان کرد که نانوسیلیس‌ها به دلیل سطح ویژه‌ی بالایی که دارند موجب ازدیاد واکنش‌ها در سطح کاتالیستی مصالح را می‌شود و واکنش‌های آبرفت که در روزهای اولیه شکل می‌گیرد، را سرعت می‌بخشند و از آنجا که این واکنش‌ها مقدمه‌ی بر واکنش‌های پوزولانیک هستند، در افزایش مقاومت مصالح خصوصاً در سنین پایین نقش به‌سزایی ایفا می‌کنند.

نکته‌ی قابل توجه این است که در مدت زمان عمل‌آوری ۳ روز، پارامتر چسبندگی مصالح حاوی میکروسیلیس، نانوسیلیس ۲۰۰ و نانوسیلیس ۳۸۰ به ترتیب حدود ۳۳، ۵۳ و ۵۷ درصد نسبت به مصالح کنترلی افزایش یافته است، درحالی که در مدت زمان عمل‌آوری ۲۸ روز، مقادیر پارامتر چسبندگی مصالح ذکرشده به ترتیب به ۵، ۷ و ۷ درصد رسیده‌اند که نقش غیرقابل انکار زود سخت‌شوندگی افزودنی نانوسیلیس در روزهای اولیه را در مواقع موردنیاز، نظیر المان‌های آب‌بند نشان می‌دهد.

۴.۵. اثر مقدار محصولات سیلیسی در رفتار مصالح خاک - سیمان

در شکل ۱۲، پارامترهای مقاومت برشی طرح اختلاط‌های گوناگون نسبت به درصد‌های متفاوت افزودنی‌های سیلیسی نشان داده شده است که مطابق نتایج آن مشاهده می‌شود که فقط با افزایش مقدار محصولات سیلیسی، پارامترهای مقاومت برشی بهبود نمی‌یابند. دلیل این مطلب را می‌توان این‌گونه بیان کرد که اصولاً مهم‌ترین فضای خالی بین محصولات پایه‌ی سیمانی، فضاهای بین لایه‌ی در ژل سیلیکات کلسیم، فضاهای موئینه و حباب‌های هوای محبوس‌شده در خمیر سیمان هستند. طبق مطالعات برخی پژوهشگران^[۱۸] قطر اسمی فضاهای بین لایه‌ی در ژل سیلیکات کلسیم که حدود ۲۸٪ کل حجم ژل را تشکیل می‌دهند، در حدود ۲ الی ۳ نانومتر بیان شده است. افزودن مقادیر نانوسیلیس می‌تواند این فضاها را پر کند، اما مطابق نتایج شکل ۳ ج، مقادیر محصولات سیلیسی در مخلوط مقدار بهینه‌ی دارند که طبق آزمایش تراکم باید محاسبه شوند.

ذکر این نکته‌ی کاربردی ضروری است که تأثیر افزایش مقادیر محصولات سیلیسی نسبت به تغییرات نوع آنها (شکل ۱۱) عملاً چشم‌گیر نیست، زیرا با تغییرات

- افزودن مصالح پایه سیلیسی علاوه بر پارامترهای مقاومت برشی، مدول کشسانی و زاویه اتساع مصالح را نیز افزایش می‌دهند که حاکی از افزایش مقاومت قفل و بست مصالح در حضور این مواد است.
- پارامتر چسبندگی طرح‌های اختلاط، با افزودن محصولات پایه سیلیسی به خاک - سیمان عموماً با افزایش زمان عمل‌آوری افزایش می‌یابند و این در حالی است که زاویه اصطکاک داخلی آن‌ها اندکی کاهش می‌یابد که دلیل آن را می‌توان به سرعت‌بخشی فرایند آبرفت در حضور محصولات سیلیسی در طرح‌های اختلاط نسبت داد.
- افزودن نانوسیلیس‌ها با سطح ویژه بالاتر سبب بهبود قابل توجه پارامترهای مقاومت برشی مخلوط می‌شود، در حالی که افزایش در مقدار نانوسیلیس‌ها، تأثیر مستقیمی در پارامترهای مقاومتی ندارد که دلیل آن را می‌توان به ایجاد خوشه‌های اضافی سیلیکات کلسیم هیدراته در حضور مواد با سطح ویژه بالاتر بیان کرد.
- محصولات نانوسیلیس در ۰/۵٪ و میکروسیلیس در ۰/۷۵٪ به مقدار پهنه‌ی خود می‌رسند که دلیل آن انباشتگی بیشتر نانوسیلیس‌ها نسبت به میکروسیلیس در اختلاط با خاک - سیمان است.
- مدل رفتاری موهر - کولمب برای تعیین رفتار مصالح خاک - سیمان - نانوسیلیس مناسب ارزیابی نمی‌شود، زیرا با افزایش تنش قائم در سطح گسیختگی، تنش‌های برشی به صورت توانی و نه خطی افزایش می‌یابند که دلیل این امر را می‌توان به تحمل مقاومت کششی این مخلوط‌ها نسبت داد، زیرا در مدل موهر - کولمب مقاومت کششی مصالح عملاً در نظر گرفته نمی‌شود.
- با افزایش مقدار تنش‌های محصورکننده، مقدار تنش برشی و مدول کشسانی مصالح خاک - سیمان و خاک - سیمان - نانوسیلیس افزایش می‌یابند و همچنین مقدار کرنش گسیختگی آن‌ها نیز افزایش می‌یابد که بیان‌گر تغییر رفتار مصالح از حالت ترد به شکل پذیر است.

منابع (References)

1. ACI (American Concrete Institute), "State of the art report on soil cement", 230, IR (2006).
2. ICOLD (International Commission on Large Dams), "Soil cement for embankment dams", Bulletin 54 (1996).
3. Qing, Y., Zenan, Z., Deyu, K. and Rongshen, K. "Influence of nano-sio2 addition on properties of hardened cement paste as compared with silicafume", *Construction and Building Materials*, **21**(3), pp. 539-545 (2007).
4. Li, G. "Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-sio2", *Cement and Concrete Research*, **34**(6), pp. 1043-1049 (2004).
5. Li, H., Xiao, H., Yuan, J. and Ou, J. "Microstructure of cement mortar with nano-particles", *Composites*, **35**(2), pp. 185-189 (2004).
6. Ji, T. "Preliminary study on the water permeability and microstructure of concrete incorporating nano-sio2", *Cement and Concrete Research*, **35**(10), pp. 1943-1947 (2004).
7. Bahmani, S.H., Huat, B., Asadi, A. and Farzadnia, N. "Stabilization of residual soil using SiO2 nanoparticles and cement", *Construction and Building Materials*, **64**, pp. 350-359 (2014).
8. Sariosseiri, F. and Muhunthan, B. "Effect of cement treatment on geotechnical properties of some Washington State soils", *Engineering Geology*, **104**(1-2), pp. 119-125 (2009).
9. Ajorloo, A., Mroueh, H. and Lancelot, L. "Experimental investigation of cement treated sand behavior under triaxial test", *Geotech. Geol. Eng.*, **30**(1), pp. 129-143 (2012).
10. Fakharian, K., Heydari, S. and Eghbali, A. "Effect of portland cement addition on anisotropic strength of sand under compression and extension triaxial tests", *Sharif Civil Engineering Journal*, **29**(2), pp. 107-115 (2012) (In Persian).
11. Sedighi, P., Eslami, A. and Aflaki, E. "Effect of cement treatment on shear strength parameters of difficult soil from southern coastlines of the Caspian sea", *Sharif Civil Engineering Journal*, **29**(4), pp. 97-128 (2013) (In Persian).
12. Taheri, A. and Tatsuka, F. "Stress-strain relations of cement-mixed gravelly soil from multiple-step triaxial compression test results", *Soils and Foundations*, **52**(4), pp. 748-766 (2012).
13. Sasanian, S. and Newson, T. "Basic parameters governing the behavior of cement treated clays", *Soils and Foundations*, **54**(2), pp. 209-224 (2014).
14. Suzuki, M., Fujimoto, T. and Taguchi, T. "Peak and residual strength characteristics of cement-treated soil cured under different consolidation conditions", *Soils and Foundations*, **54**(4), pp. 687-698 (2014).
15. Amini, Y. and Hamidi, A. "Triaxial shear behavior of a cement-treated sand-gravel mixture", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **6**(5), pp. 455-465 (2014).
16. Al-Rawas, A., Hago, A. and Al-Sarmi, H. "Effect of lime, cement and sarooj on the swelling potential of an expansive soil from oman", *Building and Environment*, **40**(5), pp. 681-687 (2005).
17. Sarrioseir, A., Razavi, M. and Carlson, B. "Stabilization of soils with portland cement and CKD and application of CKD on slope erosion control", *Advances in Geotechnical Engineering, ASCE*, **104**, pp. 778-787 (2011).
18. Ferekel, H. and Hellmig, R. "Effect of nanopowder deagglomeration on the densities of nanocrystalline ceramic green bodies and their sintering behaviour", *Nanoconstruction Materials*, **11**(5), pp. 617-622 (1999).

19. ASTM., *Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soils*, Annual Book of ASTM Standards, American Society of Testing and Materials, ASTM D 2166, Philadelphia (1989).
20. ASTM., *Test Method for Unconsolidated Undrained Compressive Strength of Cohesive Soils in Triaxial Compression*, Annual Book of ASTM Standards, American Society of Testing and Materials, ASTM D 2850, Philadelphia (1989).
21. Hamidi, A. and Haeri, S.M. "Stiffness and deformation characteristics of cemented gravelly sands", *International Journal of Civil Engineering*, **6**(3), pp. 159-173 (2008).
22. Wang, Y.H. and Leung, S.C. "Characterization of cemented sand by experimental and numerical investigations", *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **134**(7), pp. 992-1004 (2008).
23. Wang, Y.H. and Leung, S.C. "A particulate scale investigation of cemented sand behavior", *Canadian Geotechnical Engineering*, **45**(1), pp. 29-44 (2008).
24. Mahboubi, A. and Ajorloo, A. "Experimental study of the mechanical behavior of plastic concrete in triaxial compression", *Cement and Concrete Research*, **35**(2), pp. 412-419 (2005).
25. Charles, J.A. and Watts, K.S. "The influence of confining pressure on the shear strength of compacted rockfill", *Geotechnique*, **30**(4), pp.353-367 (1980).
26. Vaunat, J. and Gens, A. "Aspects of modelling geotechnical problems in hard soil and soft argillaceous rocks", Pande and Pietruszczack, Rotterdam, Balkema, pp. 37-43 (2004).
27. Manzal, D., Fernndez, J.A. and Pastor, M. "Generalized plasticity state parameter-based model for saturated and unsaturated soils", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, **35**(18), pp. 1347-1362 (2011).
28. Haeri, S.M. and Hamidi, A. "Constitutive modelling of cemented gravelly sands", *Geomechanics and Geoengineering*, **4**(2), pp. 123-139 (2009).
29. Sanchez, F. and Sobolev, K. "Nanotechnology in concrete-A review", *Construction and Building Materials*, **24**(11), pp. 2060-2071 (2010).
30. Bishop, A.W. "The influence of progressive failure on the choice of stability analysis", *Geotechnique*, **21**(2), pp. 168-172 (1971).
31. Bahmani, S.H., Farzadnia, N., Asadi, A. and Huat, B.B.K. "The effect of size and replacement content of nanosilica on strength development of cement treated residual soil", *Construction and Building Materials*, **118**, pp. 294-306 (2016).
32. Kim, H. and Samantha, P. "Compressive strength and chloride resistance of grout containing ground palm oil fuel ash", *Journal of Cleaner Production*, **112**(part 1), pp. 712-722 (2016).
33. Khaloo, A., Mobini, M.H. and Hosseini, P. "Influence of different types of nano-SiO₂ particles on properties of high-performance concrete", *Construction and Building Materials*, **112**, pp. 712-722 (2016).
34. Khaloo, A., Mobini, M.H., Hosseini, P. and Esrafil, A. "Mechanical properties of fiber-reinforced high-performance concrete incorporating pyrogenic nanosilica with different surface areas", *Construction and Building Materials*, **103**, pp. 526-538 (2015).